

Braunschweigische
Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2015

Sonderdruck
Seiten 101–110



J. CRAMER Verlag · Braunschweig
2016

Bild-Aspekte*

MARCUS MAGNOR

Institut für Computergraphik, TU Braunschweig, Mühlenpfordtstr. 23,
D-38106 Braunschweig, E-Mail: magnor@cg.cs.tu-bs.de

Bilder sind ein faszinierendes Phänomen der Natur. Jeder selbst leuchtende und jeder beleuchtete Gegenstand sendet ununterbrochen und in alle Richtungen Bilder aus, die Auskunft über ihren Ursprungsort und ihre Entstehung geben. Bilder breiten sich im freien Raum ungehindert aus, sie konservieren Information über Raum und Zeit hinweg und transportieren sie mitunter Milliarden Lichtjahre weit. Bilder sind universell. Mit unserem Sehsinn empfangen wir einen (sehr kleinen) Teil der Bilder, die die Natur ununterbrochen aussendet. Ohne Zeitverzögerung informieren sie uns über unsere nähere und weitere Umgebung. Auf Basis von Bildern lernen wir unsere Welt kennen, verstehen und auf sie zu reagieren.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die zur Entstehung von Bildern führen, sind seit langem bekannt und verstanden. Und doch ist es immer wieder verblüffend, welch wunderbar vielfältige, mitunter verwirrend komplexe und ästhetische Welt visueller Eindrücke aus dieser Handvoll physikalischer „Zutaten“ erwächst. Neben der ungestörten linearen Lichtausbreitung in Vakuum und den meisten Gasen sowie der Absorption, Reflexion und Streuung von Licht an fester Materie spielt eine zentrale Rolle für das Aussehen natürlicher Bilder, dass Materie das Bestreben hat „zusammenzuklumpen“, im Großen wie im Kleinen: elektrostatische Kräfte sorgen dafür, dass sich Silikatmoleküle zu Quarzkristallen zusammenfinden, die sich zu Granitgestein vereinigen, das Felsen und ganze Berge formt; Gravitation ist dafür verantwortlich, dass sich Materie zu einzelnen Galaxien, Sternen und Planeten verdichtet und große leere Bereiche zwischen den einzelnen Objekten entstehen, in denen sich Bilder ungehindert ausbreiten können. Wie wenig wüßten wir von unserem Universum, wenn wir keine Bilder des Kosmos empfangen könnten, vielleicht weil wir auf einem Planeten mit dichter Wolkendecke lebten, oder tief unter Wasser, oder aber uns mit unserer Sonne in einer dichten interstellaren Staubwolke befänden.

* Der Vortrag wurde am 12.06.2015 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.



Abb. 1: Bilder bestehen zum allergrößten Teil aus zusammenhängenden, homogenen Flächen. Die meiste Bildinformation steckt jedoch in den wenigen Pixel, die die kontrastreichen Begrenzungskurven dieser Flächen definieren. Werden die Pixel eines Bildes zufällig durcheinandergewürfelt ist das Ergebnis aussageloses Rauschen.

Aufgrund der Eigenheit von Materie, nicht feinverteilt und gut durchmischt im Raum zu schweben, sondern sich zu einzelnen Objekten zusammenzufinden und die Zwischenräume mit durchsichtiger Luft oder Vakuum zu „füllen“, zerfällt ein natürliches Bild grundsätzlich in eine Kollage von Einzelansichten verschiedener Objekte. Jedes einzelne Objekt zeigt sich dabei als ein zusammenhängender Bildbereich von relativ homogener Farbe und Helligkeit. Dort, wo die Bildbereiche zweier Objekte aneinanderstoßen, ändert sich die Farbe und Helligkeit im Bild sprunghaft. Natürliche Bilder bestehen daher aus großen, homogenen Flächen, die von geschlossenen, kontrastreichen Kurven begrenzt werden. Und tatsächlich sind es diese dünnen Begrenzungslinien starken Kontrasts, die den größten Teil an Bildinformation in sich tragen. Fast alle zufälligen Anordnungen der Pixel eines Bildes ergeben dagegen informationsfreies Bildrauschen: nur ein verschwindend geringer Bruchteil aller möglichen Pixelanordnungen führt zu einem „vernünftigen“ Bild. So sind natürliche Bilder komplexe Informationsträger zwischen völliger Ordnung (uniforme Fläche) und Chaos (Rauschen).

Dennoch sind Bilder fast immer nur unvollständige Boten ihres Ursprungs. Als zweidimensionale Projektionen unserer dreidimensionalen Welt gehen bei der Entstehung von Bildern zwangsläufig Informationen über die plastische Form von Gegenständen verloren. Faszinierenderweise hält die Natur jedoch eine ganze Reihe von versteckten Hinweisen im Bild bereit, die es uns ermöglichen, aus der Bildprojektion wieder auf die dreidimensionale Gestalt eines abgebildeten Objektes einer Szene zu schließen [1]. Den wohl wichtigsten Hinweis liefern dabei die schon



Abb. 2: Die Silhouette eines Objektes verrät uns bereits viel über seine Geometrie und hat einen großen Wiedererkennungswert. So können wir auch diese 13.000 Jahre alte Darstellung aus einer Höhle bei Valtorta in Spanien mühelos verstehen und uns in das Jagdgeschehen hineinversetzen.

erwähnten Begrenzungskurven der abgebildeten Objekte. Entlang der Silhouette eines Objekts steht die Oberflächennormale immer senkrecht auf Blickrichtung und Silhouettenkurve, d.h. entlang der Silhouette ist die dreidimensionale Orientierung der Objektoberfläche eindeutig festgelegt und bekannt. Zusätzlich gibt die lokale Krümmung der Silhouettenkurve Auskunft darüber, ob die lokale Geometrie konvex gekrümmt ist oder einen Sattel formt. Und schließlich haben natürliche Objekte zumeist glatte Oberflächen, sind rundlich geformt und weisen lokal oft grob achsensymmetrische Strukturen auf. Dank dieser Gegebenheiten lassen sich in Scherenschnitten Personen erkennen, mit Schattenspielen Tiere an die Wand werfen, und in wenigen Picasso-Pinselstrichen plastische Figuren erkennen.

Bilder gibt es, seit das Universum durchsichtig wurde. Die Fähigkeit, auf der Erde Bilder wahrzunehmen, ist jedoch bedeutend jünger. Noch vor 550 Millionen Jahren war die Erde ein sehr beschaulicher Ort, wohl gerade weil es noch keine



Abb. 3: 540 Millionen Jahre alte Fossilien sogenannter Trilobite sind unsere ältesten Zeugnisse komplexer Facettenaugen. Etwa zeitgleich mit der evolutionären Entstehung des Sehsinns explodierte die Vielfalt und Diversivität im Tierreich. Ein Zufall?

Lebewesen gab, die schauen konnten. Es existieren kaum Tierfossilien aus dieser und früheren Zeiten, da die damaligen Tiere noch keine festen Körperteile entwickelt hatten, sondern wohl quallengleich durch die Meere trieben. Doch vor rund 543 Millionen Jahren geschah etwas ganz Außergewöhnliches: nach 3 Milliarden Jahren recht gemächlicher evolutionärer Entwicklung auf der Erde explodierte innerhalb von nur wenigen Millionen Jahren plötzlich die Vielfalt an verschiedenartigsten Tierarten. Fossilienfunde auf der ganzen Erde belegen, dass plötzlich massenhaft Tierarten mit harten Schalen, festen Stacheln, Flossen, Schwänzen, Beinchen und: Augen die Welt bevölkerten. Was die Kambrische Explosion ausgelöst hat, ist bis heute noch nicht zweifelsfrei geklärt. Eine spannende Theorie lautet jedoch, dass die Erlangung der Fähigkeit zu sehen einer Tierart einen enormen evolutionären Vorteil bot, da sie sich nun aktiv auf Nahrungssuche begeben und auf sich nähernder Gefahren reagieren konnte [2]. Das evolutionäre Wettrüsten zwischen Jäger und Beute war eröffnet. Tierpanzer, wehrhafte Stacheln, scharfe Zähne und aktive Fortbewegungstechniken waren die Folge. Nach dieser Theorie hat die Entstehung des Sehsinns den evolutionären Druck auf alle Tierarten schlagartig massiv erhöht und so die evolutionäre Entwicklung stark beschleunigt, und diese Entwicklung hält bis heute an. Heute existieren nur noch wenige höherentwickelte Tierarten ohne Sehinn, und diese oft auch nur in versteckten ökologischen Nischen.

Doch wie kann sich eine so komplexe Struktur wie unser Auge überhaupt entwickeln, getrieben allein von natürlicher Selektion? Tatsächlich kennt die Evolutionsbiologie viele Dutzend Fälle von Tierarten, die unabhängig voneinander hochentwickelte Augen hervorgebracht haben [3]. In den vergangenen



Abb. 4: Unser Gehirn füllt den Blinden Fleck in unserem Gesichtsfeld durch Interpolation aus der Umgebung: Wer mit dem rechten Auge auf das X schaut und den Abstand zur Abbildung so wählt, dass die Richtung des Blinden Flecks zur Lücke im Sternfeld weist, hat den visuellen Eindruck, ein gefülltes Feld an Sternen zu sehen.

540 Millionen Jahren hat sich der Sehsinn viele Male unabhängig voneinander entwickelt, auf viele verschiedene Arten und Weisen. Abschätzungen legen nahe, dass sich die Entwicklung von komplexen Augen aus einfachen lichtempfindlichen Hautzellen allein auf Grundlage natürlicher Selektion innerhalb von nur wenigen hunderttausend Generationen vollziehen kann [4]. Augen sind damit weder einzigartig noch „intelligently designed“, sondern entwickeln sich unter evolutionärem Druck quasi „von selbst“.

Weshalb aber haben dann Pflanzen bis heute noch keine Augen? Vielleicht weil Pflanzen die Möglichkeit fehlt, aus Bildinformationen einen evolutionären Nutzen zu ziehen. Pflanzen haben z.B. nie Methoden entwickelt, sich aktiv fortzubewegen. So kann ein Grashalm nicht Reißaus nehmen, auch wenn es sähe, dass es gleich in einem Kuhmaul landen wird. Ohne aber die Möglichkeit, auf das Gesehene adäquat reagieren zu können, bietet der Sehsinn keinen evolutionären Vorteil.

Wir Menschen sind ein schönes Beispiel für die evolutionäre Entwicklung des Auges. Unser Blinder Fleck ist eine konstruktionsbedingte Besonderheit, die notwendig ist, weil in unserer Netzhaut die Nervenbahnen auf der der Pupille zugewandten Seite entlanglaufen. Damit Bildinformationen zum Gehirn gelangen, müssen die Nervenbahnen irgendwo von der Vorderseite durch die Retina hindurch nach hinten und aus dem Augapfel hinausgeführt werden. An dieser Durchtrittsstelle ist wegen der Nervenbahnen kein Platz für lichtempfindliche Zellen. Das ist unser Blinder Fleck, in diese Blickrichtung sehen wir tatsächlich nichts und sind blind. Ein vermeidbarer Konstruktionsfehler: bei Tintenfischen zum Beispiel liegen die Nervenbahnen auf der Netzhaut-Rückseite [3]. Tintenfische haben daher keinen Blinden Fleck. Das ist auch der Beweis, dass sich unsere Augen und die

der Tintenfische unabhängig voneinander entwickelt haben müssen. Mit unserem Augen-Bauplan befinden wir Menschen uns nun in einer evolutionären Sackgasse, denn ein „Umstülpen“ unserer Netzhaut, so dass die Nervenbahnen wie bei den Tintenfischen auf der Rückseite entlanglaufen, ist durch zufällige Mutation extrem unwahrscheinlich, weil etwaige Zwischenschritte zunächst zu einer Verschlechterung unseres Sehsinns führen würden. Glücklicherweise kommen wir mit unserem Blinden Fleck (eigentlich: unseren beiden Blinden Flecken) recht gut zurecht, denn zum einen weisen der Blinde Fleck im linken und rechten Auge in verschiedene Richtungen (etwa 15 Grad von der Blickrichtung nach außen), und zum anderen füllt unser Gehirn das Loch in unserem Blickfeld sehr gekonnt anhand der Bildinformationen rings um den Blinden Fleck auf.

Die Natur liefert uns in Bildern Informationen nicht nur in Form von Helligkeitsvariationen sondern zusätzlich durch Farben. Mithilfe von Farbe können wir z.B. Materialien voneinander unterscheiden. Dazu reichen uns Menschen drei Farbkanaäle, die über das sichtbare Spektrum verteilt sind: die drei Primärfarben rot, grün und blau. Tiere besitzen zum Teil weniger Farbkanaäle (Katzen und Hunde haben z.B. nur zwei Primärfarben), oder auch mehr (z.B. Vögel, Amphibien und Reptilien, aber auch Schmetterlinge). Für farbenblinde Menschen erscheinen bestimmte Farben gleich, am häufigsten Grün und Rot. Farbenblindheit betrifft hauptsächlich Männer, weil der Defekt erblich ist und das verantwortliche Gen ausgerechnet auf dem X-Chromosom liegt. Von Van Gogh wird gelegentlich behauptet, dass er möglicherweise farbenblind war, weil die Farbpalette in vielen seiner Gemälde der eingeschränkten Farbwahrnehmung von Farbenblinden entspricht¹. Jedoch hätte Van Gogh dann sowohl rot/grün- als auch blau/gelb-farbenblind sein müssen. Tatsächlich spielte Van Gogh sehr bewusst und absichtlich mit dem Farbkontrast komplementärer Farben, was eindeutig für einen sehr gut entwickelten Farbensinn und damit auch für eine gute Farbwahrnehmung spricht.

Unter den Grundfarben nimmt die Farbe Blau eine besondere Stellung ein. Nur 2-5% unserer Farbrezeptoren in der Netzhaut sind blauempfindlich, und direkt in Blickrichtung (im Zentrum der Fovea) sind sogar überhaupt keine blauempfindlichen Rezeptoren vorhanden [5]. Dass wir trotzdem meinen, blau zu sehen, wenn wir direkt auf blaue Gegenstände blicken, haben wir wieder der Einbildungskraft unseres Gehirns zu verdanken: wie beim Blinden Fleck interpoliert unser Gehirn aus der unmittelbaren Umgebung, wie der blaue Gegenstand wohl aussehen müsste. Weshalb aber diese geringe Dichte an Blau-Rezeptoren? Möglicherweise liegt der Grund darin, dass Blau für unsere evolutionäre Entwicklung die am wenigsten relevante Farbe war: es gibt kaum blaue Früchte, hingegen war es für unsere Vorfahren mitunter sehr wichtig, unreife grüne von reifen roten Beeren unterscheiden

¹ <http://www.smithsonianmag.com/smart-news/was-vincent-van-gogh-color-blind-it-sure-looks-like-it-27576085/?no-ist>

zu können. Und tatsächlich gibt es Hinweise, dass sich unsere Blau-Rezeptoren evolutionär deutlich später entwickelt haben als unsere Fähigkeit, rot und grün zu unterscheiden. Es gibt noch einen weiteren möglichen Grund, weshalb blau von unserem Sehsinn ein wenig stiefmütterlich behandelt wird: die Linse unseres Auges ist kein Zeiss-Objektiv und erzeugt Farbsäume im Bild auf der Netzhaut. Wenn das, was wir betrachten, im roten bis grünen Spektralbereich so scharf wie möglich abgebildet werden soll, ist das Bild im blauen Spektralbereich daher zwangsläufig ein wenig unscharf. Da bräuchte uns auch eine hohe Dichte an Blau-Rezeptoren in der Netzhaut keinen schärferen Bildeindruck.

Unser Sehsinn ist eine komplexe Maschinerie sehr vieler verschiedener Verarbeitungsschritte. Ein Gutteil unseres Gehirns ist andauernd mit der Verarbeitung und dem Verstehen unserer visuellen Eindrücke beschäftigt. Allerdings ist auf unseren Genen bei weitem nicht genug Platz, um all die zum Sehen notwendigen Gehirnstrukturen zu beschreiben. Lediglich die „Hardware“ zum Sehen wird uns vererbt sowie eine allgemeingültige Anleitung zum Sehen-Lernen. Anhand dieses Lernprogramms müssen wir uns im Säuglingsalter die „Software“ des Sehens, also die Verknüpfungen der einzelnen Verarbeitungsschritte im Gehirn, aktiv antrainieren [1]. Dabei lernen wir unter anderem, aus visuellen Eindrücken auf die geometrische Form von Gegenständen zu schließen: Säuglinge müssen daher Dinge, die sie sehen, wortwörtlich mit ihren Händen begreifen dürfen, um die Verbindung zwischen dem wahrgenommenen Bild z.B. einer Ecke oder Kante und der ertasteten Geometrie herstellen zu können. Alle Menschen durchlaufen während ihres ersten Lebensjahres dieselbe Sehschule, und zu unserem ersten Geburtstag nimmt jeder von uns die Welt so wahr, dass wir ein gemeinsames visuelles Verständnis von den Dingen um uns herum entwickelt haben.

Unser Gehirn löst fortlaufend, scheinbar mühelos, in Echtzeit und äußerst robust das beachtliche inverse Problem, aus der zweidimensionalen Projektion beliebiger Gegenstände und Szenen auf ihre dreidimensionale Struktur zu schließen. Nur so ist es möglich, dass wir viele Jahre unfallfrei mit dem Auto zur Arbeit fahren können. Die gängige Vorstellung lautet, dass unser visueller Apparat viele einzelne Hinweise im Bild, die uns lokale Szenengeometrie erschließen lassen, mit dem Wissen um die Form bereits erkannter Gegenstände zusammenführt [1]. Uneindeutigkeiten werden so eliminiert und eine einzige, konsistente Szeneninterpretation gefunden. Unser Bestreben, aus dem Gesehenen etwas Sinnhaftes zu machen, geht sogar so weit, dass wir fehlende Bildhinweise im Geiste ergänzen, ja hinzuhalluzinieren, sobald unser Sehapparat meint, eine konsistente Interpretation aus den vorhandenen Hinweisen gefunden zu haben.

Aber natürlich ist unser Sehsinn nicht unfehlbar. Durch geschicktes Anordnen von Bildhinweisen kann unser Sehsinn absichtlich irregeleitet und der Bild-Interpretationsprozess zu einem falschen Schluss geführt werden. Ein Beispiel ist Camouflage: Beutetiere versuchen, durch optisches Mimikry als etwas anderes, für den Jäger weniger Appetitliches, zu erscheinen. Umgekehrt wenden aber natürlich

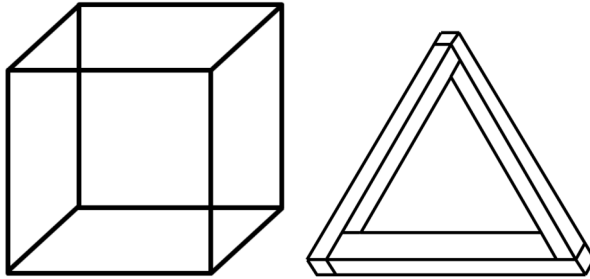


Abb. 5: Aus vielen einzelnen lokalen Geometrie Hinweisen im Bild versucht unser Gehirn, eine konsistente Interpretation zu erzeugen. Viele optische Täuschungen basieren darauf, dass mehrere plausible Interpretationen miteinander konkurrieren, oder dass lokal jeweils konsistente Interpretationen sich auf globaler Ebene widersprechen.

auch Jäger Camouflage an, um sich ihrer Umgebung optisch anzupassen und sich ihrer Beute unentdeckt zu nähern. Auch Wahrnehmungspsychologen und Neurowissenschaftler haben Spaß daran, unserem Sehsinn etwas vorzumachen, um zu verstehen, wie er funktioniert. Viele optische Täuschungen basieren darauf, sich widersprechende Bildhinweise geschickt so zu kombinieren, dass unser visuelles Gehirn nicht zu einer einzigen konsistenten Interpretation findet, sondern mehrere Interpretationen miteinander konkurrieren, oder dass eine gefundene Interpretation auf höherer Ebene Widersprüche birgt.

Der Ansatz unseres Sehsinns, einzelne Hinweise im Bild anhand unseres Wissens um bekannte Dinge in Einklang zu bringen, bedeutet, dass wir fortlaufend versuchen, in dem Gesehenen etwas Bekanntes, Sinnhaftes finden zu wollen. Fortlaufend assoziieren wir unsere Seheindrücke mit vermeintlich oder tatsächlich ähnlich aussehenden Dingen in der Datenbank in unserem Kopf. Wenn sich ein Bildeindruck einer konsistenten Interpretation widersetzt, wird unser visuelles Gehirn erst richtig angespornt, und wir empfinden Freude daran, uns der Herausforderung zu stellen und in das Gesehene etwas Sinnhaftes zu deuten [1]. Wenn wir dann schließlich tatsächlich erfolgreich etwas in dem visuellen Rätsel erkannt haben, lässt die investierte Mühe uns die erkannte Bildinterpretation für lange Zeit merken. Dieser uns innewohnende Anreiz, sich mit zunächst unzugänglichen Bildern bewusst zu beschäftigen, ist vielleicht auch ein Grund dafür, dass wir uns nicht-gegenständliche, abstrakte Kunst an die Wände hängen.

Dieser Artikel konnte nur eine kleine Auswahl an Bild-Aspekten präsentieren und diese auch nur sehr oberflächlich darstellen. Viele Wissenschaftler diverser Disziplinen arbeiten daran, sich dem faszinierenden und vielfältigen Wesen des Naturphänomens „Bild“ von verschiedenen Richtungen zu nähern. Viel Interes-



Abb. 6: Wenn wir in einem Bild nicht sofort etwas Sinnhaftes erkennen können, spüren wir den Antrieb, uns intensiver mit dem Bild beschäftigen zu wollen. Wenn wir anschließend erkannt haben, um was es sich in dem Bild handelt, merken wir es uns sehr lange. Wer dieses Bild schon einmal gesehen hat, wird den Inhalt sofort erkennen; wer es noch nie gesehen hat, wird dagegen vermutlich einen Moment brauchen.

santes über Bilder haben sie bereits herausgefunden, viel Spannendes bleibt uns noch zu entdecken.

Literaturverzeichnis

- [1] HOFFMANN, D.D. 2000: Visuelle Intelligenz: wie die Welt im Kopf entsteht. Klett-Cotta.
- [2] Parker, A. 2009: In the blink of an eye: How vision sparked the big bang of evolution. Basic Books.
- [3] INGS, S. 2007: A natural history of seeing: The art and science of vision. WW Norton & Company.
- [4] NILSSON, D.-E. & S. PELGER 1994: A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, **256**(1345):53–58, 1994.

- [5] MAGNUSSEN, S., L. SPILLMANN, F. STÜRZEL & J.S. WERNER. 2001: Filling-in of the foveal blue scotoma. – *Vision research*, **41**(23):2961–2967.